



Identification expérimentale des paramètres inertiels de la charge d'un robot Stäubli RX90

Wisama Khalil, Philippe Lemoine, Maxime Gautier, Onur Erginer

► To cite this version:

Wisama Khalil, Philippe Lemoine, Maxime Gautier, Onur Erginer. Identification expérimentale des paramètres inertiels de la charge d'un robot Stäubli RX90. Conférence Internationale Francophone d'Automatique - CIFA 2006, May 2006, Bordeaux, France. N°231, pp. 1-6. hal-00362676

HAL Id: hal-00362676

<https://hal.science/hal-00362676>

Submitted on 19 Feb 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Identification expérimentale des paramètres inertiels de la charge d'un robot Stäubli RX 90

Wisama KHALIL¹, Philippe LEMOINE², Maxime GAUTIER³, Onur ERGINER⁴

^{1,2,4} École Centrale de Nantes

³ Université de Nantes

IRCCyN UMR CNRS 6597, 1 rue de la Noë, BP 92101, 44321 Nantes Cedex 3, France

^{1,2,3}

<mailto:Prenom.Nom@irccyn.ec-nantes.fr>

<http://www.irccyn.ec-nantes.fr/irccyn/d/fr/equipes/Robotique/Presentation>

Résumé — Dans cet article nous présentons l'identification des paramètres inertiels de la charge d'un robot Stäubli RX 90. La connaissance de ces paramètres peut être utilisée pour mettre à jour le réglage de la commande afin d'améliorer la précision du robot, et pour la vérification de la masse transportée. L'expérimentation a été faite en utilisant le contrôleur Stäubli (version CS8) qui permet d'avoir accès aux positions, vitesses et couples articulaires. Nous présentons quatre modèles d'identification linéaires par rapport aux paramètres dynamiques afin d'identifier les paramètres inertiels de la charge. La solution revient alors à résoudre un système linéaire surdéterminé au sens des moindres carrés.

Mots clés — Identification, paramètres dynamiques, paramètres inertiels, moindres carrés, modèle dynamique.

I. INTRODUCTION

L'identification des paramètres dynamiques des robots-manipulateurs a fait l'objet de nombreuses recherches [1-10]. Les méthodes proposées présentent de nombreux points communs, notamment : l'utilisation d'un modèle de connaissance linéaire vis-à-vis des paramètres dynamiques et l'estimation des paramètres par des techniques de moindres carrés ordinaires ou pondérés. Dans ces approches les travaux expérimentaux ont été effectués sur des prototypes de laboratoire ou sur des robots industriels après avoir remplacé le contrôleur par un système dédié ouvert. Dans cet article nous utilisons une nouvelle génération de contrôleurs donnant accès aux variables articulaires nécessaires pour l'identification et nous mettons l'accent sur l'identification des paramètres de la charge. L'article est organisé comme suit : le paragraphe 2 décrit la modélisation du robot RX 90 et donne un rappel sur le modèle d'identification dynamique. Le paragraphe 3 présente l'identification des paramètres dynamiques du robot à vide, puis le paragraphe 4 présente quatre méthodes pour l'identification des paramètres inertiels de la charge, le paragraphe 5 contient la conclusion.

II. MODÉLISATION DU ROBOT RX 90

La structure du robot Stäubli RX-90 (figure 1) est du type série avec six articulations rotoïdes, $n = 6$, sa charge nominale est 6 Kg.

A. Description géométrique

Pour décrire la géométrie du robot, nous utilisons les notations de Khalil et Kleininger [11,12]. Les paramètres géométriques du robot RX 90 sont donnés dans le tableau 1.

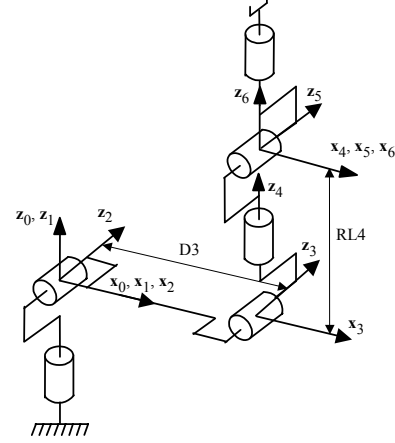


Figure 1. Placement des repères pour le robot Stäubli RX-90

j	σ_j	α_j	d_j	θ_j	R_j
1	0	0	0	θ_1	0
2	0	$-\pi/2$	0	θ_2	0
3	0	0	$D3=0,45m$	θ_3	0
4	0	$\pi/2$	0	θ_4	$RL4=0,45m$
5	0	$-\pi/2$	0	θ_5	0
6	0	$\pi/2$	0	θ_6	0

Tableau 1. Paramètres géométriques du robot Stäubli RX-90

Notons l'existence d'offsets sur les variables articulaires des axes 2 et 3 entre notre notation et les mesures fournies par le contrôleur Stäubli, de telle sorte que :

$$\theta_{2\text{staubli}} = \theta_2 + \pi/2, \quad \theta_{3\text{staubli}} = \theta_3 - \pi/2$$

B. Construction et solution du modèle d'identification dynamique

Le modèle dynamique inverse du robot peut être obtenu par l'algorithme de Newton-Euler sous la forme suivante [12] :

$$\Gamma = \mathbf{ID}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}; \chi) \quad (1)$$

où \mathbf{q} , $\dot{\mathbf{q}}$, $\ddot{\mathbf{q}}$, Γ sont respectivement les vecteurs (6x1) des positions, vitesses, accélérations et couples articulaires, χ étant le vecteur (Npx1) des paramètres dynamiques (inertiels et de frottement) standard du robot.

Ce modèle peut s'écrire sous la forme suivante, linéaire par rapport aux paramètres [2,12] :

$$\Gamma = \Phi(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \chi \quad (2)$$

Φ étant une matrice de dimension (nxNp).

Le vecteur χ s'écrit :

$$\chi = [\chi^{1T} \chi^{2T} \dots \chi^{nT}]^T \quad (3)$$

avec χ^j les paramètres dynamiques du corps et actionneur j :

$$\chi^j = [XXj \ XYj \ XZj \ YYj \ YZj \ ZZj \ MXj \ MYj \ MZj \ Mj \ IAj \ F_{sj} \ F_{vj}]^T \quad (4)$$

où XXj, XYj, XZj, YYj, YZj, ZZj, sont les éléments de la matrice d'inertie, MXj, MYj, MZj sont les premiers moments, Mj la masse du corps, IAj l'inertie de l'actionneur exprimée au niveau articulaire, F_{sj} et F_{vj} les paramètres de frottement sec et de frottement visqueux de la chaîne d'actionnement de l'articulation exprimés côté articulaire.

En retenant le modèle simplifié habituel des frottements secs et visqueux pour les vitesses non nulles, on peut écrire l'expression du frottement sur l'articulation j par :

$$\Gamma_{fj} = F_{sj} \text{sign}(\dot{q}_j) + F_{vj} \dot{q}_j \quad (5)$$

Le système d'équations à résoudre pour estimer les paramètres dynamiques s'obtient en mesurant (ou estimant) $(q, \dot{q}, \ddot{q})(i)$ et $\Gamma(i)$ (i = 1, ..., e), e étant le nombre d'échantillons, sur un mouvement donné. Puis on utilise l'équation (2) afin de construire un système linéaire surdéterminé de r équations à Np inconnues :

$$Y(\Gamma) = W(q, \dot{q}, \ddot{q}) \chi + \rho \quad (6)$$

où W est la matrice d'observation de dimension (rxNp) avec $r \gg Np$, Np est le nombre de paramètres = 13n et ρ est le vecteur des résidus ou vecteur des erreurs. Les paramètres sont estimés en utilisant les moindres carrés pondérés.

En regroupant les équations de chaque articulation, le vecteur Y et la matrice W s'écrivent alors :

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ \dots \\ Y_n \end{bmatrix}, W = \begin{bmatrix} W_1 \\ \dots \\ W_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

avec :

Y_i et W_i représentant les équations de l'articulation i, de telle sorte que :

$$Y_i = \begin{bmatrix} \Gamma_i(1) \\ \dots \\ \Gamma_i(e) \end{bmatrix}, W_i = \begin{bmatrix} \Phi(i,:)(1) \\ \dots \\ \Phi(i,:)(e) \end{bmatrix} \quad (8)$$

où $\Phi(i,:)(j)$ désigne la ligne correspondant à l'articulation i dans le modèle d'identification pour l'échantillon numéro j. Chaque équation de l'articulation i est pondérée par l'inverse de l'écart type du résidu calculé sur le système d'équations (8) de l'articulation i [3]. Cette pondération revient également à normaliser les couples articulaires par rapport à la norme de leur amplitude.

Pour éliminer les ondulations hautes fréquences non modélisées dans le vecteur des couples Γ , on filtre le vecteur Y ainsi que les colonnes de la matrice d'observation W. Ce processus, appelé filtrage parallèle [13], peut être effectué par

la fonction "decimate" (Signal Processing ToolBox) de Matlab.

Pour avoir une solution unique du système, la matrice d'observation W doit être de rang plein. Pour ce faire, on doit déterminer un jeu de paramètres identifiables encore appelés *paramètres de base* (voir paragraphe II-D) [2,12].

Pour simplifier l'écriture, on supposera dans la suite que χ ne contient que les paramètres dynamiques de base. La matrice W est composée des c colonnes associées à ces paramètres.

On définit la solution $\hat{\chi}$ de l'équation (6) au sens des moindres carrés par :

$$\hat{\chi} = \underset{\chi}{\text{argmin}} \|\rho\|_2 \quad (9)$$

Si W est de rang maximum, la résolution analytique de ce problème conduit à la relation :

$$\hat{\chi} = (W^T W)^{-1} W^T Y = W^+ Y \quad (10)$$

où W^+ désigne la matrice pseudo-inverse de W. Cette solution est calculée numériquement par une procédure itérative basée sur la factorisation QR de la matrice W [1].

On calcule une estimation de l'écart-type sur les valeurs identifiées en considérant que W est déterministe et que ρ est un vecteur aléatoire centré, de composantes indépendantes, d'écart-type σ_ρ et de matrice de variance-covariance C_ρ telle que [1] :

$$C_\rho = E(\rho \rho^T) = \sigma_\rho^2 I_r \quad (11)$$

E désignant l'espérance mathématique et I_r la matrice unité d'ordre r.

En supposant que le vecteur des erreurs est centré, de composantes indépendantes et d'égales dispersions, l'écart-type σ_ρ peut être calculé par l'estimateur non biaisé suivant :

$$\sigma_\rho^2 = \frac{\|Y - W\hat{\chi}\|^2}{(r - c)} \quad (12)$$

La matrice de variance-covariance de l'erreur d'estimation a alors pour expression :

$$C_{\hat{\chi}} = E[(\chi - \hat{\chi})(\chi - \hat{\chi})^T] = W^+ C_\rho (W^+)^T = \sigma_\rho^2 (W^T W)^{-1} \quad (13)$$

On en déduit l'écart-type sur le j^{ème} paramètre :

$$\sigma_{\hat{\chi}_j} = \sqrt{C_{\hat{\chi}}(j,j)} \quad (14)$$

L'écart-type relatif est estimé par :

$$\sigma_{\hat{\chi}_{jr}}^{\%} = 100 \frac{\sigma_{\hat{\chi}_j}}{|\hat{\chi}_j|} \quad (15)$$

L'écart-type relatif peut être utilisé comme critère pour déterminer la qualité de l'estimation de chaque paramètre. En général, on considère qu'un paramètre est mal identifié lorsque $\sigma_{\hat{\chi}_{jr}}^{\%}$ est plus grand qu'un certain seuil définit entre 5 et 10 selon le système. L'élimination des paramètres mal identifiés à cause de leur faible contribution dans le modèle dynamique permet de définir un jeu de paramètres dynamiques réduit qui représente bien la dynamique du robot. Ces paramètres sont appelés paramètres essentiels [1]. Dans cet article les paramètres essentiels sont calculés par une procédure itérative d'élimination des paramètres de base. A chaque itération le paramètre dont l'écart-type relatif est le plus élevé est éliminé et les paramètres du modèle simplifié sont estimés de nouveau

ainsi que leur écart-type relatif et σ_{pe} l'écart-type du résidu. La procédure s'arrête lorsque $\sigma_{pe} \geq 1.02 \sigma_p$ (σ_p est l'écart-type du résidu initial calculé selon l'équation (12) en utilisant les paramètres de base).

C. Particularité du robot RX 90

Le robot RX 90 présente les deux particularités suivantes :

1. L'existence d'un ressort de contrepoids sur l'axe 2 qui compense une grande partie des couples de gravité sur cet axe. Le couple dû au ressort est calculé en fonction de la variable articulaire θ_2 à partir de données fournies par le constructeur. Cette valeur est additionnée au couple moteur mesuré de l'axe 2.
2. L'existence d'un couplage entre les axes 5 et 6. Cette relation est donnée par :

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_5 \\ \dot{q}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r5 & 0 \\ r6 & r6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_5 \\ \dot{q}_6 \end{bmatrix} \text{ d'où } \begin{bmatrix} \Gamma_{c5} \\ \Gamma_{c6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r5 & r6 \\ 0 & r6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Gamma_{r5} \\ \Gamma_{r6} \end{bmatrix} \quad (16)$$

avec

\dot{q}_j : vitesse du rotor du moteur j,

\dot{q}_j : vitesse de l'articulation j,

Γ_{c_j} : couple moteur sur l'articulation j, en tenant compte du couplage,

Γ_{r_j} : couple électromagnétique au rotor du moteur j,

$r5$: rapport de réduction de l'axe 5,

$r6$: rapport de réduction de l'axe 6, axe 5 bloqué.

La prise en compte des inerties et des frottements des chaînes d'actionnement 5 et 6 conduit aux équations des couples suivantes :

$$\Gamma_{c5} = \Gamma_5 + IA_6 \ddot{q}_6 + F_{vm6} \dot{q}_6 + F_{sm6} \text{sign}(\dot{q}_6) \quad (17)$$

$$\Gamma_{c6} = \Gamma_6 + IA_6 \ddot{q}_5 + F_{vm6} \dot{q}_5 + F_{sm6} \text{sign}(\dot{q}_5) \quad (18)$$

avec

Γ_5 , Γ_6 donnés par l'équation (2), et qui contiennent déjà les

éléments $(IA_j \ddot{q}_j + F_{vj} \dot{q}_j + F_{sj} \text{sign}(\dot{q}_j))$ pour $j=5$ et 6)

$$IA_5 = r5^2 JA_5 + r6^2 JA_6,$$

$$IA_6 = r6^2 JA_6,$$

JA_5 et JA_6 sont les moments d'inertie des rotors des moteurs 5 et 6 respectivement,

F_{vm6} et F_{sm6} sont des paramètres de frottement introduits par le couplage des axes 5 et 6.

D. Calcul des paramètres de base

Pour que la matrice d'observation soit de rang maximal, le vecteur des paramètres à identifier doit contenir seulement les paramètres de base. Ces paramètres peuvent être obtenus à partir des paramètres standard dans le cas d'un robot série par des règles formelles simples [12]. Cette opération conduit à éliminer les paramètres sans effet sur le modèle dynamique et à en regrouper d'autres par combinaisons linéaires. Le tableau 2 donne les paramètres inertiels de base du robot RX 90, où les paramètres notés « 0 » désignent les paramètres sans effet ainsi que les paramètres qui ont été éliminés par regroupement, tandis que les paramètres notés « R » désignent les paramètres regroupés. Les formules analytiques de regroupement sont les suivantes :

$$\begin{aligned} ZZ1R &= IA1 + d3^2(M3 + M4 + M5 + M6) + YY2 + YY3 + ZZ1 \\ XX2R &= -d3^2(M3 + M4 + M5 + M6) + XX2 - YY2 \end{aligned}$$

$$XZ2R = -d3^2(MZ3 + XZ2)$$

$$ZZ2R = IA2 + d3^2(M3 + M4 + M5 + M6) + ZZ2$$

$$MX2R = d3^2(M3 + M4 + M5 + M6) + MX2$$

$$XX3R = 2^2 MZ4^2 RL4 + (M4 + M5 + M6) RL4^2 + XX3 - YY3 + YY4$$

$$ZZ3R = 2^2 MZ4^2 RL4 + (M4 + M5 + M6) RL4^2 + YY4 + ZZ3$$

$$MY3R = MY3 - MZ4 - (M4 + M5 + M6) RL4$$

$$XX4R = XX4 - YY4 + YY5 \quad (19)$$

$$ZZ4R = YY5 + ZZ4$$

$$MY4R = MY4 + MZ5$$

$$XX5R = XX5 - YY5 + YY6$$

$$ZZ5R = YY6 + ZZ5$$

$$MY5R = MY5 - MZ6$$

$$XX6R = XX6 - YY6$$

Une méthode numérique basée sur la factorisation QR de la matrice \mathbf{W} de l'équation (6), formée à partir des mesures, permet de calculer les paramètres de base pour des mouvements quelconques en utilisant un seul modèle standard correspondant à l'équation (2) [14].

Le modèle dynamique du robot RX90 est fonction de 54 paramètres de base répartis en 40 paramètres inertiels présentés dans le tableau 2, 12 paramètres de frottement articulaires (F_{vj} et F_{sj} pour $j=1, \dots, 6$) et 2 paramètres de frottement sec et visqueux dus au couplage des axes 5 et 6 (F_{vm6} et F_{sm6}).

j	XX _j	XY _j	XZ _j	YY _j	YZ _j	ZZ _j	MX _j	MY _j	MZ _j	M _j	IA _j
1	0	0	0	0	0	ZZ1R	0	0	0	0	0
2	XX2R	XY2	XZ2R	0	YZ2	ZZ2R	MX2R	MY2	0	0	0
3	XX3R	XY3	XZ3	0	YZ3	ZZ3R	MX3	MY3R	0	0	IA3
4	XX4R	XY4	XZ4	0	YZ4	ZZ4R	MX4	MY4R	0	0	IA4
5	XX5R	XY5	XZ5	0	YZ5	ZZ5R	MX5	MY5R	0	0	IA5
6	XX6R	XY6	XZ6	0	YZ6	ZZ6	MX6	MY6	0	0	IA6

Tableau 2. Paramètres inertiels de base pour le robot Stäubli RX-90

III. IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES DYNAMIQUES DU ROBOT RX 90

A. Acquisition des données et identification

L'identification des paramètres dynamiques du robot sans charge a été effectuée en utilisant 18 mouvements passant chacun par au moins 14 points intermédiaires choisis de façon intuitive pour assurer une bonne excitation des paramètres. Par exemple, les mouvements en paliers de vitesse axe par axe permettent d'exciter les paramètres de frottement. La génération des mouvements utilise l'interpolateur du contrôleur CS8. Les positions et couples articulaires ont été enregistrés avec une fréquence d'échantillonnage de 250 Hz. Le conditionnement de la matrice d'observation pour l'ensemble de ces mouvements est de 58. Le nombre total d'équations est d'environ $r = 63000$. Un mouvement supplémentaire a été utilisé pour la validation croisée.

L'estimation de $\dot{\mathbf{q}}$ et de $\ddot{\mathbf{q}}$ est effectuée par un filtrage passe bande à phase nulle de \mathbf{q} . Ce filtre est composé d'un filtre passe bas aller-retour de Butterworth d'ordre 4 et d'une simple ou double dérivation numérique par différence centrée selon la formule suivante [3] :

$$\dot{\mathbf{q}}(k) = [\mathbf{q}(k+1) - \mathbf{q}(k-1)] / 2T \quad (20)$$

avec T la période d'échantillonnage.

Après une première identification, nous avons retenu des 54 paramètres de base 28 paramètres essentiels donnés dans le tableau 3.

Paramètre	Estimation	Écart-type relatif %	Paramètre	Estimation	Écart-type relatif %
ZZ1R	12.4	0.22	FS3	12.5	0.5
FV1	27.5	0.32	MX4	-0.06	5.39
FS1	21.4	0.69	IA4	0.86	0.31
XX2R	-7.64	0.45	FV4	5.7	0.27
XZ2R	-0.86	3.08	FS4	5.81	0.58
ZZ2R	11.2	0.27	IA5	0.28	2.29
MX2R	15.9	0.1	FV5	4.69	0.62
FV2	26.9	0.5	FS5	1.53	2.4
FS2	20.1	0.89	YZ6	-0.03	3.21
XX3R	1.16	2.42	IA6	0.1	1.32
ZZ3R	1.3	0.83	FV6	1.29	0.8
MY3R	-3.2	0.22	FS6	0.6	2.39
IA3	1.49	0.81	FVM6	1.02	0.68
FV3	6.84	0.59	FSM6	0.81	1.94

Tableau 3. Valeurs estimées des paramètres essentiels

B. Validation des résultats

La validation des résultats d'identification a été réalisée en comparant les couples mesurés $Y_{mesuré}$ et les couples estimés $W\chi_{estimé}$ sur un mouvement qui n'a pas été utilisé dans l'identification (validation croisée). Cette procédure de validation n'est pas présentée ici faute de place, par contre les résultats d'identification de la charge présentés dans la suite valident bien les techniques d'identification présentées.

IV. IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES INERTIELS DE LA CHARGE

A. Algorithmes et procédures utilisés

Ayant obtenu les valeurs des paramètres dynamiques du robot sans charge, nous présentons dans ce paragraphe l'identification des paramètres inertiels d'une charge fixée sur l'organe terminal du robot. Quatre méthodes ont été proposées. Pour les tester, nous avons exécuté les mêmes trajectoires utilisées pour identifier le robot à vide en fixant sur l'organe terminal une charge dont les paramètres inertiels sont calculés par le logiciel CATIA afin de pouvoir juger de l'efficacité des méthodes proposées.

1) Méthode 1 : Utilisation des paramètres identifiés du robot

Avec une charge le système d'équation dynamique peut être décomposé sous la forme suivante :

$$Y_T = W(q, \dot{q}, \ddot{q})\chi + W_c(q, \dot{q}, \ddot{q})\chi_c + \rho \quad (21)$$

avec

Y_T : Le vecteur des couples mesurés du robot avec la charge sur l'organe terminal,

W : La matrice d'observation correspondant aux paramètres du robot à vide,

χ : Le vecteur des paramètres dynamiques du robot (déjà identifiés),

χ_c : Le vecteur (10x1) des paramètres inertiels de la charge,

W_c : La matrice d'observation correspondant aux paramètres inertiels de la charge.

D'après l'équation (21) nous obtenons l'estimation des paramètres de la charge par :

$$\hat{\chi}_c = (W_c)^+ (Y_T - W\chi) \quad (22)$$

On note que la matrice W_c est de rang maximal, donc les dix paramètres inertiels sont identifiables.

On remarque que cette méthode suppose que les paramètres de frottement ne varient pas avec la charge, sinon il faut les prendre en compte dans W_c et χ_c .

2) Méthode 2 : Réidentification complète du robot et utilisation de certains paramètres identifiés à vide

On identifie les nouveaux paramètres du robot avec la charge, et connaissant les paramètres inertiels du robot à vide, on en déduit les paramètres dynamiques de la charge par soustraction directe concernant les paramètres identifiables du corps terminal et en utilisant les formules de regroupement pour les paramètres du corps terminal qui ont été regroupés sur les autres paramètres du robot. Lorsqu'un paramètre du corps terminal a été regroupé sur plusieurs paramètres, l'estimation de ce paramètre s'effectue en utilisant toutes les formules de regroupement au sens des moindres carrés. Soit $\Delta\chi_i$ la variation d'un paramètre du robot due à la charge, telle que :

$$\Delta\chi_i = \hat{\chi}_i(\text{robot avec charge}) - \hat{\chi}_i(\text{robot à vide}) \quad (23)$$

Les paramètres XYc, XZc, YZc, ZZc, MXc, MYc s'obtiennent directement à partir de $\Delta XY6$, $\Delta XZ6$, $\Delta YZ6$, $\Delta ZZ6$, $\Delta MX6$, $\Delta MY6$ (paramètres du corps 6 non regroupés). Par contre les paramètres XXc, YYc, MZc et Mc s'obtiennent à partir des formules de regroupements (19) :

$$\begin{aligned} \Delta ZZ1R &= D3^2 * Mc \\ \Delta XX2R &= -D3^2 * Mc \\ \Delta ZZ2R &= D3^2 * Mc \\ \Delta MX2R &= D3 * Mc \\ \Delta XX3R &= RL4^2 * Mc \\ \Delta ZZ3R &= RL4^2 * Mc \\ \Delta MY3R &= -RL4 * Mc \end{aligned} \quad (24)$$

et

$$\begin{aligned} \Delta XX5R &= YYc \\ \Delta ZZ5R &= YYc \end{aligned} \quad (25)$$

$$\Delta MY5R = -MZc \quad (26)$$

$$\Delta XX6R = XXc - YYc \quad (27)$$

Le paramètre Mc est estimé par la solution des équations (24) au sens des moindres carrés. De même le paramètre YYc est obtenu par la solution des équations (25), tandis que les paramètres MZc et XXc sont obtenus directement à partir des équations (26) et (27) respectivement.

3) Méthode 3 : Utilisation des couples mesurés à vide et avec la charge sur un même mouvement

Dans cette méthode, on suppose que le terme $W\chi$ de l'équation (21) est égal aux couples du robot à vide déjà mesurés. Cette méthode présente l'avantage de ne pas avoir besoin de connaître les valeurs des paramètres dynamiques du robot à vide. Elle suppose que les différences entre les valeurs des positions articulaires au cours des mouvements à vide et avec la charge soient négligeables et que les paramètres de frottement ne varient pas avec la charge. La différence en position mesurée sur le robot RX 90 au cours de l'expérimentation avec une charge de 7,025 Kg était inférieure

à 10^{-3} rad., ce qui a permis d'obtenir de bons résultats avec cette méthode.
L'estimation des paramètres de la charge est obtenue par la résolution de l'équation (22) après avoir remplacé $\mathbf{W} \chi$ par \mathbf{Y}_v représentant les mesures des couples articulaires sur le même mouvement à vide, ce qui donne :

$$\hat{\chi}_c = (\mathbf{W}_c)^+ (\mathbf{Y}_T - \mathbf{Y}_v) \quad (28)$$

On note qu'avec cette méthode avec le nombre de paramètres à identifier n'est que de 10, ce qui permet d'utiliser un nombre restreint d'équations pour l'identification.

4) Méthode 4 : Identification globale du robot et de la charge

Dans cette méthode le système d'équations à résoudre est formé par la concaténation des équations dynamiques des mouvements à vide et des mouvements en charge. Les mouvements à vide et en charge peuvent être des mouvements différents, contrairement à ceux de la méthode 3. Le système à résoudre est représenté par :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_v \\ \mathbf{Y}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_v & \mathbf{0} \\ \mathbf{W}_T & \mathbf{W}_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \chi \\ \chi_c \end{bmatrix} \quad (29)$$

où \mathbf{Y}_v représente le vecteur ($r_v \times 1$) des couples mesurés lors du mouvement à vide, \mathbf{Y}_T le vecteur ($r_T \times 1$) des couples mesurés lors du mouvement avec la charge, $\mathbf{0}$ est la matrice nulle de dimension ($r_v \times 10$), \mathbf{W}_v la matrice d'observation correspondant aux paramètres du robot lors du mouvement à vide, \mathbf{W}_T les colonnes de la matrice d'observation correspondant aux paramètres du robot lors du mouvement avec la charge, et \mathbf{W}_c les colonnes de la matrice d'observation ($r_T \times 10$) correspondant aux paramètres inertiels de la charge. Le vecteur des paramètres de base du système (29), qui est composé des paramètres de base du robot à vide et des paramètres de la charge, est estimé en utilisant les moindres carrés pondérés sur l'ensemble des mouvements. Dans ce nouveau système d'équations les 10 paramètres de la charge sont identifiables.

B. Les résultats de l'expérimentation

Nous avons testé les méthodes présentées ci-dessus avec deux charges différentes de 4,275 Kg et 7,025 Kg. Les paramètres inertiels de ces charges ont été calculés (valeurs dites à priori) par le logiciel CATIA et leur masse a été mesurée sur une balance avec une précision de ± 50 grammes. Les quatre méthodes d'identification ont donné des résultats presque identiques. Nous détaillons les résultats des méthodes 3 et 4 qui ne nécessitent pas l'identification préalable des paramètres du robot à vide.

Les tableaux 4 et 5 montrent les résultats d'identification des paramètres inertiels des deux charges par la méthode 3. On remarque que les paramètres \mathbf{XX}_c , \mathbf{YY}_c , \mathbf{MZ}_c et \mathbf{Mc} sont très bien identifiés. Les autres paramètres dont les valeurs nominales sont proches de zéro ne sont pas identifiables et leurs valeurs estimées peuvent être considérées comme nulles. Les tableaux 6 et 7 donnent les résultats d'estimation des paramètres inertiels des deux charges et des paramètres du

robot par la méthode 4. On remarque que les paramètres du robot en charge (tableaux 6 et 7) sont très proches de ceux obtenus sans la charge (tableau 3).

Paramètre	A priori	Identifié	$2 \sigma_\chi$	$\sigma_{\chi_T} \%$
XXc	0.107	0.100	0.019	9.417
XYc	0	0.002	0.009	186.524
XZc	0	0.009	0.009	55.045
YYc	0.107	0.103	0.018	8.570
YZc	0	-0.001	0.009	396.795
ZZc	0.004	-0.002	0.012	402.512
MXc	0	0.021	0.015	35.153
MYc	0	0.011	0.015	69.670
MZc	0.632	0.675	0.020	1.478
Mc	4.275	4.342	0.045	0.523

Tableau 4. Identification de la charge de 4,275 kg avec la méthode 3

Paramètre	A priori	Identifié	$2 \sigma_\chi$	$\sigma_{\chi_T} \%$
XXc	0.161	0.157	0.019	5.931
XYc	0	0.007	0.009	66.152
XZc	0	0.008	0.009	62.705
YYc	0.161	0.153	0.018	5.738
YZc	0	-0.005	0.009	91.418
ZZc	0.035	0.025	0.012	24.612
MXc	0	0.034	0.015	21.869
MYc	0	0.006	0.015	119.190
MZc	1.003	0.977	0.020	1.015
Mc	7.025	7.216	0.045	0.313

Tableau 5. Identification de la charge de 7,025 kg avec la méthode 3

Paramètre	A priori	Identifié	$2 \sigma_\chi$	$\sigma_{\chi_T} \%$
ZZ1R		12.5	0,036	0,146
FV1		29.1	0,130	0,223
FS1		21.0	0,214	0,508
XX2R		-7.7	0,049	0,317
XZ2R		-0.865	0,035	2,039
ZZ2R		11.3	0,043	0,188
MX2R		15.9	0,024	0,074
FV2		26.9	0,202	0,377
FS2		21.0	0,264	0,630
XX3R		1.22	0,039	1,590
ZZ3R		1.28	0,015	0,603
MY3R		-3.18	0,011	0,176
IA3		1.51	0,017	0,567
FV3		7.11	0,062	0,433
FS3		12.6	0,093	0,369
IA4		0.866	0,004	0,215
FV4		5.97	0,022	0,181
FS4		5.68	0,045	0,394
IA5		0.278	0,010	1,717
FV5		4.62	0,046	0,496
FS5		2.3	0,060	1,300
YZ6		-0.0192	0,001	3,103
IA6		0.103	0,002	0,926
FV6		1.15	0,014	0,602
FS6		0.837	0,021	1,278
FVM6		1.04	0,011	0,529
FSM6		0.68	0,022	1,636
XXc	0.107	0.109	0,007	3,220
YYc	0.107	0.104	0,007	3,255
MZc	0.632	0.666	0,008	0,626
Mc	4.275	4.04	0,034	0,417

Tableau 6. Identification des paramètres dynamiques du robot et de la charge de 4,275 kg avec la méthode 4

Paramètre	A priori	Identifié	$2 \sigma_{\chi}$	$\sigma_{\chi r} \%$
ZZ1R		12,6	0,040	0,158
FV1		29,3	0,139	0,237
FS1		21,7	0,228	0,526
XX2R		-7,77	0,053	0,339
XZ2R		-0,866	0,039	2,227
ZZ2R		11,4	0,046	0,204
MX2R		15,9	0,026	0,081
FV2		27,3	0,218	0,399
FS2		21,3	0,286	0,670
XX3R		1,23	0,042	1,723
ZZ3R		1,3	0,017	0,655
MY3R		-3,17	0,012	0,189
IA3		1,48	0,019	0,636
FV3		7,09	0,067	0,472
FS3		12,8	0,102	0,399
MX4		-0,052	0,004	4,252
IA4		0,866	0,004	0,231
FV4		6,0	0,023	0,191
FS4		5,8	0,048	0,412
IA5		0,28	0,010	1,847
FV5		4,73	0,049	0,519
FS5		2,31	0,063	1,369
YZ6		-0,02	0,001	3,246
IA6		0,104	0,002	0,997
FV6		1,2	0,015	0,612
FS6		0,82	0,022	1,371
FVM6		1,05	0,012	0,552
FSM6		0,7	0,024	1,679
XXc	0.161	0,157	0,008	2,572
YYc	0.161	0,151	0,008	2,567
ZZc	0.035	0,027	0,002	4,487
MZc	1.003	0,979	0,010	0,495
Mc	7.025	6,7	0,039	0,294

Tableau 7. Identification des paramètres dynamiques du robot et de la charge de 7,025 kg avec la méthode 4

V. CONCLUSION

Nous avons présenté dans cet article les expérimentations effectuées pour identifier les paramètres inertiels d'un robot RX 90 ainsi que les paramètres inertiels d'une charge fixée sur l'organe terminal. Nous avons utilisé un contrôleur industriel de type CS8. La validation des résultats a été effectuée par la comparaison des couples mesurés avec les couples calculés par le modèle, ainsi que par la comparaison des valeurs estimées des paramètres de la charge avec les valeurs a priori de ces paramètres. Nous avons montré que les paramètres de la charge peuvent être estimés en utilisant les données de positions et de couples articulaires d'un mouvement d'une dizaine de points intermédiaires. Pour la méthode 3, ce mouvement doit être exécuté une première fois par le robot à vide, puis une deuxième fois par le robot muni de la charge. Cette procédure ne nécessite pas l'identification préalable du robot à vide, et présente un calcul rapide du fait de la réduction du nombre de paramètres à identifier. Pour la méthode 4, l'identification globale des paramètres de la charge et du robot peut utiliser des mouvements différents à vide et en charge. Cette méthode est donc moins contraignante sur les mouvements utilisés et, suite à un premier mouvement à vide, permettrait à l'issue de chacun des mouvements suivants de procéder à une mise à jour des paramètres de la charge et d'exercer une surveillance du robot en observant l'évolution de ses paramètres. Les résultats expérimentaux montrent l'efficacité des méthodes présentées.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Monsieur Luc JOLY chef du département automatique de Stäubli pour avoir mis à notre disposition une armoire de commande CS8, Monsieur Paul MOLINA pour la conception et la réalisation des pièces de fixation des masses sur l'organe terminal du robot RX90, et Monsieur Damien CHABLAT pour le calcul des paramètres inertiels des charges grâce à l'utilisation du logiciel CATIA.

RÉFÉRENCES

- [1] Gautier M., Khalil W., « Chapitre 4 : Identification des paramètres des modèles », du livre « Analyse et Modélisation des Robots Manipulateurs », sous la coordination de Dombre E., Hermes, 2001.
- [2] Gautier M., « Contribution à la Modélisation et à l'Identification des Robots », Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Nantes, Ecole Nationale Supérieure de Mécanique, 1990.
- [3] Gautier M., « Dynamic Identification of Robots with Power Model », *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p.1922-1927, Albuquerque, NM, USA, 20-25 Avril 1997
- [4] Geffard F., « Etude et Conception de la Commande en Effort d'un Télémanipulateur Equipé d'un Capteur d'Efforts à sa Base et à son Extrémité », Thèse de Doctorat, Université de Nantes. 2000.
- [5] Guegan S., Khalil W., Lemoine Ph., « Identification of the Dynamic Parameters of the Orthoglide », *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Tapei, Taiwan, Septembre 2003, p.3272-3277.
- [6] Kozłowski K., « Modelling and identification in robotics ». Springer-Verlag London Limited, Great Britain, 1998.
- [7] Prüfer M., Schmidt C., Wahl F., « Identification of Robot Dynamics with Differential and Integral Models: A Comparison », *Proceedings 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Diego, California, USA, Mai 1994, p.340-345.
- [8] Restrepo P.P., « Contribution à la Modélisation, Identification et Commande des Robots à Structures Fermées : Application au Robot ACMA SR400 », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes. 1996.
- [9] Vandanjon P.O., Gautier M., Desbats P., « Identification of Robots Inertial Parameters by Means of Spectrum Analysis », *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1995, p.3033-3038.
- [10] Lu Z., Shimoga K. B., Goldenberg A. A., « Experimental Determination of Dynamic Parameters of Robotic Arms », *Journal of Robotics Systems*, Vol. 10, N°8, 1993, p.1009-1029.
- [11] Khalil W., Kleinfinger J.F., « A New Geometric Notation for Open and Closed Loop Robots », *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1986, San Francisco, p. 1174-1180.
- [12] Khalil W., Dombre E., « Modélisation, identification et commande des robots », Hermès, PARIS, 1999.
- [13] Richalet J., « Pratique de l'identification, 2^{ème} édition », Hermès, Paris, 1998.
- [14] Gautier M., « Numerical calculation of the base inertial parameters », *Journal of Robotics Systems*, Vol. 8, N°4, 1991, pp. 485-506.